**Thèse présentée pour le Doctorat de l'Université de Strasbourg**
(Mention : MÉDECINE)

Année 1922 N° 7

RÉGIME LOCAL

# THÈSE

POUR

## LE DOCTORAT EN MÉDECINE

PAR

**Jean Hœffel,**
Né à Bouxwiller, le 23 octobre 1898
Assistant au service central de Radiologie de l'hôpital-civil de Strasbourg

# JONOMÉTRIE et son APPLICATION à la RADIOTHÉRAPIE PROFONDE

*Président :* M. Léon BLUM, *Professeur.*

Travail du service central de Radiologie
de M. le docteur Gunsett

STRASBOURG
IMPRIMERIE CENTRALE CH. HILLER
1922

# THÈSE

POUR LE

# DOCTORAT EN MÉDECINE

THÈSE

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

Thèse présentée pour le Doctorat de l'Université de Strasbourg
(Mention : MÉDECINE)

Annee 1922 N° 7

OCAL

# THÈSE

POUR

## E DOCTORAT EN MÉDECINE

PAR

**Jean Hœffel,**
Né à Bouxwiller, le 23 octobre 1898
Assistant au service central de Radiologie de l'hôpital-civil de Strasbourg

---

# ONOMÉTRIE et son APPLICATION
# la RADIOTHÉRAPIE PROFONDE

---

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

*Président :* M. Léon BLUM, *Professeur.*

---

Travail du service central de Radiologie
de M. le docteur Gunsett

STRASBOURG
IMPRIMERIE CENTRALE CH. HILLER
1922

# FACULTÉ DE MÉDECINE DE STRASBOURG

*Doyen* . . . . . MM. WEISS O. ✻ ✪ I.
*Assesseur* . . . . . BOUIN ✻ ✪ I.

*Professeurs*

| | |
|---|---|
| Embryologie . . . . . | MM. ANCEL ✻ ✪ I. |
| Anatomie . . . . . | FORSTER ✪ A. |
| Histologie . . . . . | BOUIN ✻ ✪ I. |
| Physiologie . . . . . | N . . . |
| Physique biologique . . . . . | WEISS O. ✻ ✪ I. |
| Chimie biologique . . . . . | NICLOUX ✪ I. |
| Anatomie pathologique . . . . . | MASSON ✪ A. |
| Pharmacologie, Médecine expérimentale . | AMBARD ✪ A. |
| Hygiène, Bactériologie . . . . . | BORREL O. ✻ ✪ I. |
| Médecine légale . . . . . | CHAVIGNY O. ✻ ✪ |
| Clinique médicale . . . . . | BARD O. ✻ ✪ I. |
| | BLUM Léon ✻ ✪ A. |
| Clinique chirurgicale . . . . . | SENCERT O. ✻ ✪ I. |
| | STOLZ ✻ ✪ A. |
| Clinique ophtalmologique . . . . . | DUVERGER ✪ A. |
| Clinique dermatologique . . . . . | PAUTRIER ✻ ✪ A. |
| Clinique psychiatrique . . . . . | PFERSDORFF ✪ A. |
| Clinique neurologique . . . . . | BARRÉ ✻ ✪ A. |
| Clinique oto-rhinolaryngologique . . . | N . . . |
| Clinique gynécologique et accouchement . | SCHICKELÉ ✪ A. |

*Chargés de cours*

MM. ARON Max ✪ A.
BELLOCQ ✪ A.
BLUM (Paul) ✻ ✪ I.
CANUYT
GELMA ✪ A.
GÉRY ✪ A.
BOEZ **(Méd. d'argent épidémies)**
GUNSETT ✪ A.
HANNS ✻ ✪ A.
HUGEL ✪ A.
MM. KELLER ✪ A.
LICKTEIG ✪ A.
WEILL ✪ A.
REEB ✪ A.
ROHMER ✪ A.
SCHAEFFER ✪ A.
SCHWARTZ ✪ A.
STROHL, agrégé ✪ A
VAUCHER ✪ A.
FONTES

Par délibération en date du 9 décembre 1798, l'École a arrêté qu
les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doive
être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend le
donner aucune approbation ni improbation.

A MON PÈRE

Le Docteur TIMOTHÉE HŒFFEL

*En témoignage d'affection*
*et de reconnaissance.*

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548028_0050

# AVANT-PROPOS

*Avant d'aborder cette étude qu'il nous soit permis d'adresser l'assurance de notre respect et de notre profonde reconnaissance à M. le Professeur Léon Blum qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre thèse.*

*Nous tenons particulièrement à présenter à M. le docteur Gunsett, chargé de cours à la faculté de Médecine, l'expression de notre plus vive gratitude. M. le docteur Gunsett nous a inspiré le sujet de notre thèse, et nous lui adressons nos meilleurs remerciements pour le bienveillant intérêt qu'il a bien voulu nous témoigner et les précieux conseils qu'il nous a donnés au cours de ce travail.*

# AVANT-PROPOS

Avant d'aborder cette étude qu'il nous soit permis d'adresser l'assurance de notre respect et de notre profonde reconnaissance à M. le Professeur Léon Blum qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre thèse.

Nous tenons particulièrement à présenter à M. le docteur Gunsett, chargé de cours à la faculté de Médecine, l'expression de notre plus vive gratitude. M. le docteur Gunsett nous a inspiré le sujet de notre thèse, et nous lui adressons nos meilleurs remerciements pour le bienveillant intérêt qu'il a bien voulu nous témoigner et les précieux conseils qu'il nous a donnés au cours de ce travail.

# PLAN.

## INTRODUCTION.

## CHAPITRE I

BASES PHYSIQUES ET PRINCIPES DE L'IONOMETRIE

1. Ionisation des substances radioactives.

2. Premiers appareils de mesure des rayons X basés sur le principes d'ionisation des gaz.

3. Jonisation en général.

4. Appareils de mesure actuels, leur principe et leur emploi en radiothérapie.

## CHAPITRE II

APPLICATION DE L'IONOMETRE A LA RADIOTHERAPIE PROFONDE

A. Interprétation de la méthode ionométrique, considérations sur les lois de propagation et d'absorption des rayons Röntgen

1. Loi du carré de la distance.
2. Absorption des rayons X par la matière.
3. Rôle des rayons secondaires diffusés.

B. Détermination de la dose profonde, son amélioration:

1. Par un filtrage de plus en plus conséquent.
2. Par l'augmentation du champ d'irradiation.
3. Par l'augmentation de la distance focale.

C. Autres applications pratiques de l'ionométrie.

## CONCLUSIONS

PREMIERE PARTIE.

## HISTORIQUE.

Dès la découverte des rayons Röntgen, on remarqua que les rayons X avaient la propriété de décharger les corps électrisés.

Benoist et Hurmuzescu présentent le trois février 1896 à l'Académie des Sciences de Paris (1) une communication sur des nouvelles propriétés des rayons X. Ces auteurs ont fait agir les rayons d'un tube de Crookes sur les feuilles d'or d'un électroscope, éloigné de 20 à 30 cm du tube et chargé successivement d'électricité positive et négative. Ils observèrent que les rayons X déchargeaint immédiatement et complètement l'électroscope, plus rapidement si la charge était négative que si elle était positive. Cette action se produisait aussi à travers des plaques d'aluminium interposés entre tube et électroscope, mais était plus difficile à obtenir en faisant traverser les rayons par du verre, du laiton et du zinc. Les deux auteurs fondèrent sur cette propriété une nouvelle méthode d'investigation pour étudier les lois de transmission et de production des rayons X, et démontrèrent l'exactitude de la loi du carré des distances et le caractère hétérogène d'un faisceau de rayons X.

Swyngedauw (2) conduit par une analogie de certaines propriétés des radiations ultra-violettes et des radiations X, essaya l'action des rayons X sur les potentiels explosifs et montra que les radiations X abaissent les potentiels explosifs statiques et dynamiques suivant les mêmes lois générales que les radiatons ultra-violettes.

Righi (3) avait fait en même temps que Benoist et Hurmuzescu des recherches sur la décharge des corps électriques par les rayons

(1) Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences, tome 122 page 235 et 379 (1896).

(2) Comptes Rendus, tome 122 page 375.

(3) Comptes Rendus. tome 122 page 376 et 601.

Röntgen. Il employa un électromètre comme appareil de mesure, en communication avec un disque métallique, muni d'une charge électrique. Il trouva qu'avec une charge initiale positive la décharge n'était pas complète, par contre avec une charge négative non seulement le corps se déchargeait, mais aussi il se formait une charge positive. Il trouva en outre que l'interposition d'une lame de verre, d'une lame d'aluminium, d'une planche de sapin ou de la main de l'expérimentateur n'empêchait pas l'action des rayons X, mais ne faisait que l'affaiblir. Righi mesura le premier l'intensité des rayons X au moyen de leur action sur les corps électrisés en procédant de la façon suivante : Un disque de cuivre est en communication avec un électromètre de Mascart et en même temps par l'intermédiaire d'une colonne d'alcool absolu avec le pôle isolé d'une série de 2 à 10 petits accumulateurs. Le potentiel $V_0$ du disque descend à $V_1$, lorsque les rayons X tombent sur lui, et comme on constate que la différence $V_0 - V_1$ est sensiblement proportionnelle à $V_1$ on peut prendre $\frac{V_0 - V_1}{V_1}$ comme mesure de la dispersion électrique.

Righi vérifia en répétant ses expériences que ce rapport $\frac{V_0 - V_1}{V_1}$ était proportionnel à l'intensité de la radiation reçue par le disque et tira de là un moyen. pour mesurer l'intensité relative des rayons Röntgen.

Perrin (1) étudia la question à fond. Il avait trouvé comme ses prédécesseurs que les rayons X pouvaient décharger en quelques secondes un corps électrisé, simplement en traversant le milieu gazeux qui l'environne. Il supposait déjà que les rayons Röntgen dissociaient les molécules gazeuses en libérant ainsi des ions positifs et des ions négatifs. En présence d'un champ électrique les ions positifs devaient être attirés vers le champ électrique et les ions négatifs repoussés dans le sens contraire. Perrin arriva aux mêmes conclusions que Righi, c'est-à-dire que la quantité d'électricité neutre, dissociée par les rayons, était mesurable étant proportionnelle à l'intensité du rayonnement. En plus, il étudia les variations de

(1) Comptes Rendus tome 123 page 351 et 878.

pression et de température et leur influence sur la dissociation des molécules gazeuses. Il put montrer que la quantité d'électricité dissociée était indépendante de la pression, mais proportionnelle à la température absolue des gaz.

Des physiciens anglais comme Thomson (1) et Rutherford (2) ont pratiqué de leur côté des expériences pour élucider le phénomènes d'ionisation. Rutherford s'est occupé spécialement de la vitesse des ions produits par les rayons Röntgen et les rayons de Becquerel, et a trouvé par des mesures comparatives que la vitesse des ions produits par les rayons X était égale à la vitesse des ions produits par le corps radioactif.

---

## BASES PHYSIQUES ET PRINCIPES DE L'IONOMETRIE.

Les substances radioactives possèdent comme les rayons X la propriété d'ioniser les gaz. Ce fait fut reconnu très tôt par Becquerel et peut être démontré facilement. Il suffisait de poser un corps radioactif très près d'un électroscope chargé, et la décharge se montrait par la chute brusque des feuillets d'or. Aussi profita-t-on immédiatement de cette propriété importante pour pratiquer des mesures de radioactivité, méthode qui est encore employée aujourd'hui. On se demanda alors à quel rayonnement en particulier devait être attribuée cette action ionisante, et il se trouva que les rayons $\alpha$ qui sont des atomes d'hélium chargés positivement et qui sont comparables aux rayons canaux produits dans un tube de Crockes, ont le plus grand pouvoir ionisant. Les rayons $\beta$ n'ont qu'un pouvoir ionisant très réduit et l'ionisation produite par les rayons $\gamma$ est plutôt due au rayonnement $\beta$ qui

(1) Proceedings of the Royal Society of London 59, page 274 (1896).

(2) The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 42, page 392 (1896).

Phil. Mag., 44, page 429; Phil. Mag., 47, page 109.

Proceedings of the Cambridge Physical Society, 9, page 410 (1896).

résulte de la transformation des rayons primaires $\gamma$ traversant la matière. (1)

Mais les appareils de mesure employés dans le domaine de la radioactivité n'ont pas pu être utilisés pour mesurer les rayons X. Les courants d'ionisation produits par les corps radioactifs sont bien plus faibles que ceux des rayons Röntgen, la radiation du Radium étant sur son trajet déjà absorbée par une couche d'air de quelques centimètres d'épaisseur. En outre, le rayonnement X se distingue par une émission plus forte de rayons secondaires se composant du rayonnement secondaire diffusé, du rayonnement dit caractéristique et du rayonnement corpusculaire. On hésita donc longtemps à employer cette méthode pour mesurer les rayons Röntgen, bien que Villard avait montré, il y a plus de 13 ans, que la vitesse, avec laquelle un électroscope était déchargé sous l'influence des rayons X, pouvait servir à mesurer leur quantité.

Se basant sur ces phénomènes des rayons X, Villard (2) avait réalisé un appareil nommé «Radiosclérométre», destiné à mesurer la *qualité* des rayons X. Cet appareil se composait d'un électromètre à quadrants dont l'aiguille était reliée à une lame de métal radiochroïque comme l'aluminium qui a un coëfficient d'absorption différent pour les rayons de longueur d'onde différente. Cette lame A était placée entre deux plateaux B et C, maintenus à des potentiels constants. Un faisceau de rayons X, dirigé sur l'ouverture pratiquée dans l'enveloppe protectrice générale arrivait dans l'espace A-B et après avoir traversé le filtre A, arrivait dans l'espace A-C et produisait l'ionisation de l'air contenu dans les deux chambres. L'ionisation produite dans l'espace A-C était nécessairement moindre que l'ionisation produite entre A et B, une partie des rayons étant absorbée par le filtre A. L'absorption des rayons X par le filtre A était différente pour des rayons durs et des rayons mous, et le rapport des degrés d'ionisation de

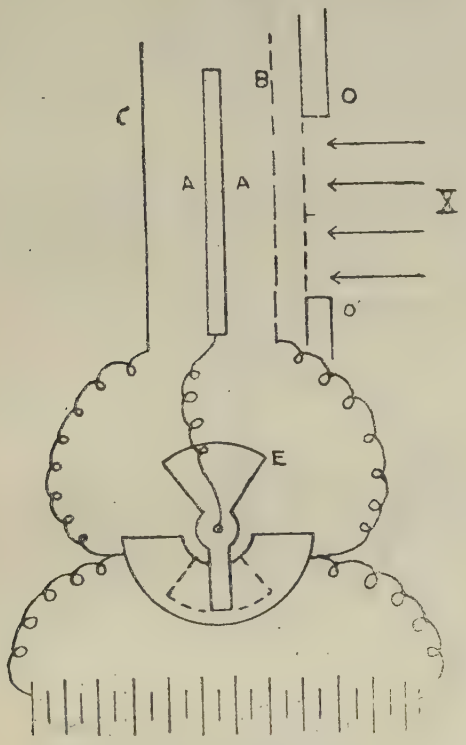
(1) Wilson: The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 17 page 216. 1909.

Bragg: Phil. Mag. 20 page 385 1910 et Proceedings of the Royal Society of London A 85, page 349 1911.

(2) Archives d'Électricité Médicale 1908 page 692.

l'air traversé par un faisceau de rayons Röntgen avant et après filtration par un corps radiochroïque, était indiqué par l'électromètre. L'aiguille de l'électromètre se déplaçait devant une échelle graduée en degrés Benoist et indiquait comme le radiochromomètre le pouvoir pénétrant des rayons.

Fig. 1

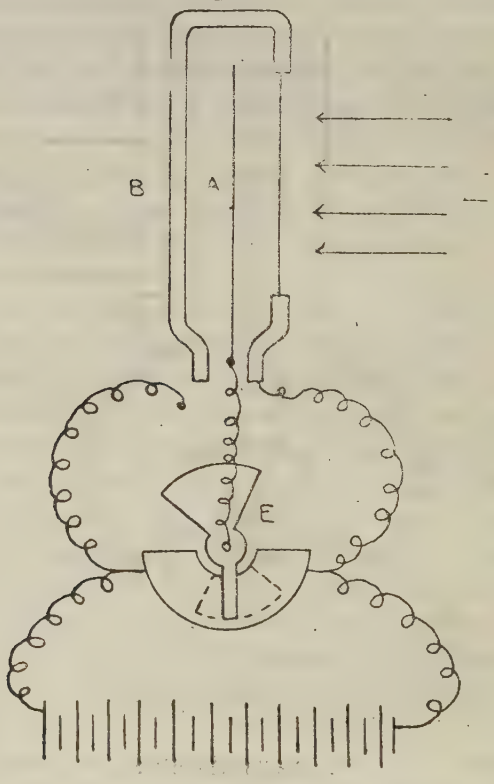



Radiosclérométre

Pendant que le radiosclérométre ne nous renseignait que sur la *qualité* du rayonnement X, le « *Compteur* » de Villard, basé sur le même principe de l'ionisation, mesurait directement la *quantité* des rayons absorbés et réalisait ainsi le premier jonto-quantimètre. Tous les ionomètres construits depuis cette époque ne sont qu'un modèle plus ou moins modifié de ce premeir appareil de mesure et il importe de connaître sa construction. Il était

constitué par une boîte d'ionisation qui recevait les rayons X par une ouverture de grandeur déterminée. A l'intérieur de cette boîte se trouvait une électrode en communication avec l'aiguille d'un électromètre. Les parois de la boîte étaient maintenues à un potentiel constant. L'aiguille de l'électromètre est chargée par les ions que produisent les rayons en traversant l'air. Pour une

Fig. 2




Quantitomètre de Villard

certaine charge cette aiguille se déplace, vient toucher un contact qui renverse sa charge et qui renvoit l'aiguille à son point de départ. L'émission succesive eds rayons fait osciller l'aiguille entre deux points, un compteur d'horlogerie totalise les mouvements de l'électromètre et indique sur un cadran la quantité des rayons absorbés. L'appareil était gradué en unités H, mais Villard

eut déjà l'idée d'adopter une unité physique plus précise, car il s'exprime de la façon suivante : « L'unité de quantité de rayons X est celle qui libère par ionisation une unité électrostatique par centimètre cube d'air dans les conditions normales de température et de pression. » L'appareil de mesure de Villard avait malheureusement le désavantage d'être assez compliqué et d'être très délicat, et des difficultés de technique ont empêché que cet appareil put servir au dosage pratique des rayons X.

Szillard (1), après avoir présenté à l'Académie des Sciences un électromètre pour mesures de radioactivité d'un maniement très facile, imagina quelque temps plus tard un iontoquantimètre destiné à mesurer les rayons Röntgen. Cet appareil était constitué d'une source électrique et d'un électromètre, les deux se trouvant dans un châssis. Un long conducteur flexible relie l'appareil de mesure avec le récepteur qui est une chambre d'ionisation et qui porte à l'intérieur une petite tige métallique, l'extrémité du fil conducteur servant comme électrode. Les parois de la chambre d'ionisation sont de plomb, laissant à la partie supérieure une petite fenêtre recouverte d'une lame d'aluminium, comme porte d'entrée pour les rayons incidents. Le volume de la chambre d'ionisation est de 1 centimètre cube. Cet appareil permettait comme le nouvel ionomètre de Solomon, de pratiquer les mesures sur place, c'est-à-dire sur le champ d'irradiation même. Mais il avait un grand défaut. Szillard avait négligé l'influence des rayons secondaires. On sait qu'un corps métallique, traversé par un faisceau de rayons X, émet une partie de ce rayonnement en forme de rayons dits caractéristiques dépendant directement des propriétés physiques de ce corps traversé. Or, les parois de la chambre d'ionisation contiennent du plomb et l'air contenu dans cette chambre sera rendu conducteur par les rayons primaires incidents et les rayons caractéristiques du plomb. Cette addition de rayons primaires et secondaires rend tout calcul inexact, comme les rayons secondaires varient avec le degré de pénétration des rayons primaires employés, des rayons d'une longueur d'onde

(1) Archives d'électricité médicale, II, 1914, page 24, et Strahlentherapie Bd, 5, page 742 (1914).

courte produisant plus de rayons secondaires que des rayons peu pénétrants. L'iontoquantimètre de Szillard ne fut guère employé. Comme unité absolue Szillard avait proposé le méga-mégaion, c'est-à-dire l'énergie d'un rayonnement qui produit sous des conditions normales de température et de pression atmosphérique le nombre de 1 million X 1 million ou de mille milliards d'ions.

La question de l'ionométrie radiologique fut reprise en Allemagne et plusieurs modèles ont été construits. Un ionomètre pratique et permettant des mesures exactes fut décrit par Friedrich et Kroenig. La particularité et le grand avantage de cet appareil est le fait que la chambre d'ionisation est constituée par des corps à poids atomique très petit, éliminant de cette façon autant que possible l'influence fâcheuse de l'émission des rayons secondaires.

## IONISATION.

La physique nous enseigne que tous les gaz sont considérés comme de bons isolateurs. Des corps munis d'une charge électrique bien isolés et entourés par un gaz, gardent leur charge pendant un temps très long, et le courant produit par la conductibilité des gaz est tellement faible qu'il ne peut être mesuré que par un appareil de mesure extrêmement sensible.

Un gaz peut être rendu bon conducteur en présence d'une flamme ou d'un métal incandescent. Le même effet peut être obtenu par les rayons ultraviolets. L'ionisation produite par les rayons Röntgen est beaucoup plus importante, sa radiation possédant une énergie cinétique beaucoup plus élevée.

La conductibilité même des gaz peut être expliquée par l'hypothèse de la formation d'ions positifs et d'ions négatifs aux dépens des molécules gazeuses. Sous l'influence d'un champ électrique, ces ions acquièrent une très grande vitesse et produisent ainsi un courant électrique.

Giese (1) avait déjà ainsi expliqué la conductibilité des gaz

(1) Wiedemanns Annalen page 519 1882.

émanant d'une flamme et Mc. Clelland (1) en examinant un courant d'air passant le long d'un fil incandescent y trouva, si la température dépassa 400 degrés, un nombre égal d'ions positifs et d'ions négatifs.

Barkla (2) nous a montré que l'ionisation produite par les rayons X ne montrait aucun rapport avec l'absorption de ces rayons qui dépend directement et intégralement du poids atomique des substances absorbantes. Il avait trouvé que l'ionisation produite dans l'acide sulfhydrique était plus grande que dans l'anhydride sulfureux, corps qui était pourtant d'un poids atomique plus élevé que $S H^2$.

Il en conclut que l'ionisation n'était pas un phénomène atomique, mais dépendait de la constitution moléculaire.

Des connaissances plus détaillées sur la nature de l'ionisation nous ont été communiquées par Wilson (3) Grâce à un dispositif ingénieux, qui permettait de rendre visible sur une plaque photographique le trajet parcouru par les rayons ionisants.

Wilson avait imaginé une chambre contenant un volume d'air donné sursaturé de vapeur d'eau. La chambre était traversée par un faisceau de rayons X au moment où l'expansion provoquait la détente brusque de l'air sursaturé. La vapeur d'eau était condensée autour des ions, produits sur le trajet des rayons et les petites gouttes formées par eux étaient illuminées par une source lumineuse et photographiées en même temps.

L'étude de toute une série de clichés, obtenus de cette façon, permettait de conclure que l'ionisation par les rayons X était un phénomène secondaire. L'ionisation devait être attribuée aux électrons produits par les rayons Röntgen.

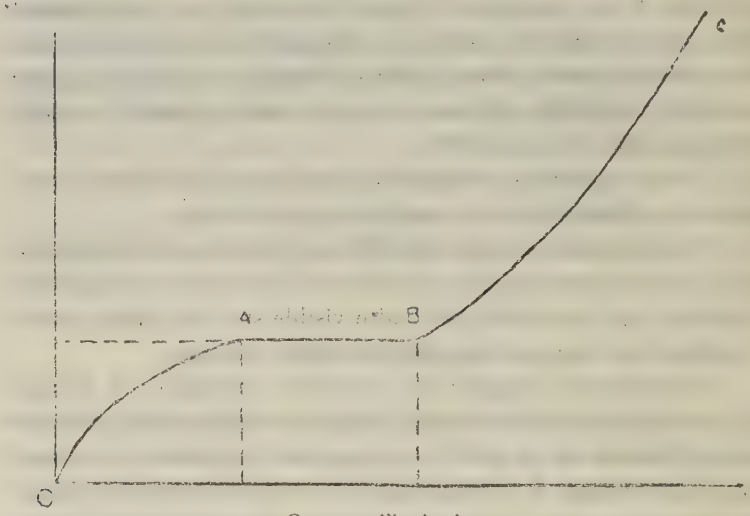
Le mécanisme de l'ionisation des gaz par les rayons Röntgen a été étudié en employant le dispositif suivant.

Un faisceau de rayons X est dirigé entre deux lames en métal dont l'une est isolée et reliée à un électromètre, pendant que l'autre est reliée à une source à potentiel élevé. En augmentant graduelle-

(1) Phil. Mag. 46 page 29 1898.
(2) Phil. Mag. 21 1911.
(3) Proceedings of the Royal Society of London A 85 page 285 1911.

ment la force électromotrice et en déterminant chaque fois l'intensité du courant produit entre les deux lamelles et que nous nommons courant de saturaration, on peut se rendre compte qu'il existe une relation entre la force électromotrice et le courant d'ionisation, relation qui peut être exposée par la courbe suivante:

Fig. 7




Courant d'ionisation:

en abscisse — force électromotrice
en ordonnée — courant d'ionisation

La forme exacte de la courbe dépend des conditions sous lesquelles les expériences ont été faites, de la nature, de la pression, de la température du gaz, mais les courbes ont toujours le même type.

Au début, le courant d'ionisation augmente avec la force électromotrice jusqu'à A. Entre A et B le courant reste constant, il a atteint le courant de saturation. A partir de B le courant monte de nouveau rapidement avec la force électromotrice.

La nature des ions doit nous expliquer ces faits. Nous savons que les molécules gazeuses produisent sous l'influence des rayons Röntgen un certain nombre d'ions positifs et d'ions négatifs L'agitation moléculaire leur donne une certaine vitesse, fait rapprocher les ions de signes contraires et rend ainsi possible leur

recombinaison à un corps neutre. En outre les ions, se mouvant avec une vitesse très grande, s'étendent comme les molécules gazeuses uniformément là où ils sont produits; prenant contact avec les parois ils perdent leur charge électrique et reviennent comme particules déchargés. La conductibilité du gaz est ainsi diminuée par recombinaison et par diffusion.

Rapprochons ces données pour expliquer notre courbe et nous pourrons dire la chose suivante: Tant que nous employons une force électromotrice faible, tous les ions ne sont pas mis en mouvement pour le transport électrique, une grande partie des ions peut se réunir en recombinaison, le courant d'ionisation restera donc faible. En augmentant la force électromotrice le nombre des recombinaisons diminue, la vitesse des ions augmente, tous les ions sont mis en mouvement et il n'y a qu'une petite partie d'ions qui reste inutilisable pour le transport électrique par recombinaison ou par diffusion. A ce moment le courant d'ionisation reste constant, il est appelé courant de saturation, il dépend essentiellement de l'intensité de la source ionisante. Nous voyons immédiatement l'importance que prend la question du courant de saturation dans la pratique de l'ionométrie et l'intérêt qu'il y a à employer des forces électromotrices suffisantes pour obtenir le courant de saturation.

A partir de B notre courbe montre une nouvelle ascension, pour l'obtenir il faut employer des énergies plus considérables qui communiquent aux ions des vitesses de plus en plus grandes et une énergie cinétique croissante. Les ions deviennent capables d'ioniser les atomes neutres qu'ils rencontrent, non seulement les ions négatifs, mais aussi les ions positifs produisent de nouveaux ions. On observe alors le phénomène d'ionisation par chocs.

En résumé les principes de l'ionométrie sont les suivants:

Sous des conditions normales les atomes gazeuses contiennent un nombre égal de charges positives et de charges négatives, c'est-à-dire les atomes montrent une charge électrique neutre.

Sous l'influence des rayons Röntgen ou des rayons de corps radioactifs, l'atome qui a perdu un électron négatif et qui possède la charge complémentaire, devient un ion positif tandis que le corpuscule forme un ion négatif. Le gaz est dit ionisé. Le nombre

des ions produits par les électrons qui sont eux produits par les rayons X est en proportion avec l'énergie röntgénienne et le courant d'ionisation produit par un faisceau de rayons X homogènes nous donne une mesure de l'intensité du rayonnement.

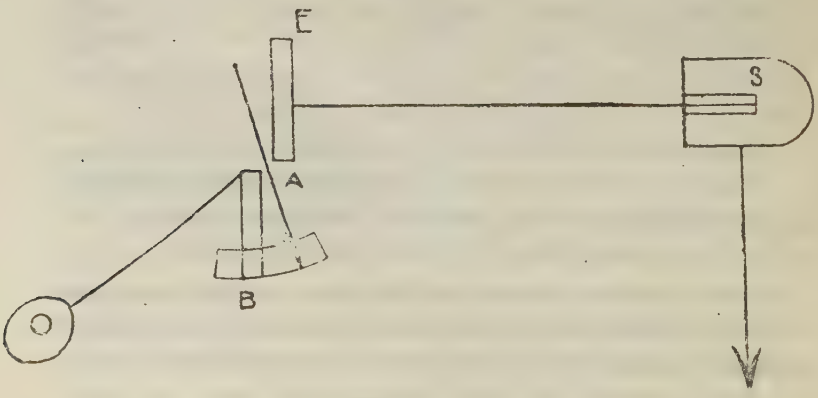
## APPAREILS DE MENURE ACTUELS

Le schema d'un ionomètre comme il est employé actuellement est représenté par l'esquisse suivante.

Nous avons un électromètre E avec deux lames dont une que nous nommons A est mobile et l'autre que nous nommons B est fixe.

L'électromètre reçoit sa charge électrique par un petit appareil à frottement. L'électromètre chargé, l'aiguille mobile A s'éloigne de la lame fixe B. La chambre d'ionisation Y est reliée à l'électromètre par un conducteur qui se termine dans la chambre par la pointe S. En dirigeant un faisceau de rayons X sur la chambre d'ionisation, l'électromètre, en contact avec la pointe S, perdera sa charge électrique, et l'aiguille mobile se rapprochera d'autant plus vite de la lame B que l'intensité du courant d'ionisation sera grande. Le courant d'ionisation étant proportionnel à la quantité des rayons absorbés dans la chambre d'ionisation nous n'avons qu'à observer le temps de la décharge de l'électromètre qui nous donnera une mesure de la quantité des rayons absorbés.

Fig. 4.



Deux ionomètres, 2 modèles différents, étaient à notre disposition pour effectuer ces mesures de dosage indispensables en radiothérapie profonde.

Le premier modèle construit par la maison Reiniger, Gebbert et Schall, se compose d'une chambre d'ionisation, d'un électromètre, d'un petit appareil électrostatique à frottement, de trois diaphragmes, permettant d'augmenter le champ des rayons incidents de $6 \times 8$ à $9 \times 12$ et à $10 \times 15$ centimètres et de 2 cuves à eau; l'une servant comme « corps de diffusion » est placée derrière la chambre d'ionisation, on imite de cette faon autant que possible le rayonnement diffus tel qu'il est produit dans le corps à irradier. La seconde cuve est placée devant la chambre d'ionisation, et permet de mesurer l'absorption des rayons en une profondeur de 10 centimètres d'eau. Le tout est monté sur une table roulante, pouvant être transportée facilement.

L'électromètre, la partie la plus importante est soigneusement isolé, entouré de l'ambre et d'une lame épaisse de caoutchouc. Une échelle graduée permet d'enregistrer exactement la charge électrique de l'électromètre, qui est assurée par une petite machine à frottement. L'appareil de mesure est relié par un câble à la chambre d'ionisation. Le conducteur isolé par de l'ambre se termine dans la chambre d'ionisation par une petite tige en aluminium, entourée d'un cylindre. Toutes les parties métalliques de l'appareillage sont recouvertes de bons isolateurs pour assurer une bonne protection électrostatique et l'appareil de mesure en entier est entouré en surplus d'une cage de Faraday. Une ouverture à l'abri des rayons X par deux lames en plomb laisse entrer le câble conducteur. Une lampe électrique éclaire l'échelle graduée et facilite un contrôle exacte des mouvements de l'aiguille de l'électromètre. Une coulisse en plomb peut être maniée de façon à retenir à chaque moment l'invadiation de la chambre d'ionisation.

L'ionomètre de Solomon et son emploi ont été décrit dans le Journal de radiologie et d'électrologie (1).

Nous ne ferons que résumer sa description. Cet appareil se

(1) Novembre 1921, page 509.

compose d'un appareil de mesure, d'une chambre d'ionisation et d'un conducteur. L'appareil de mesure est un électroscope à feuille d'or à deux sensibilités par l'emploi de deux capacités différentes. L'introduction d'un condensateur à air, situé à l'intérieur de l'électroscope, ralentit la chute de la feuille d'or et permet d'enregistrer la totalité des rayons X absorbés pendant une séance de radiothérapie. La feuille d'or se déplace sur une échelle graduée de 60-10 degrés. L'appareil de mesure est chargé au moyen d'une petite machine à frottement. L'électroscope est entouré d'une épaisse cuirasse en plomb reliée à la terre, garantissant une bonne protection électrostatique et empêchant toute influence des rayons X qui ne doivent agir sur l'électroscope que par l'intermédiaire de la chambre d'ionisation.

La chambre d'ionisation est constituée par un petit cylindre creux en graphite, renfermant une tige centrale également en graphite, isolée des parois du cylindre et reliée au conducteur. Le conducteur relie la chambre d'ionisation à l'électroscope; il est formé d'un fil en acier, protégé contre les fuites spontanées et recouvert d'un tube en laiton. Chaque ionomètre est étalonné par le constructeur avec une quantité connue de Radium, et on nomme R l'ionisation équivalente à celle de 1 gramme de Radiumélément en une seconde, placée à 20 millimètres de la chambre d'ionisation et filtré sur 0,5 mm de platine. R est donc une unité d'intensité, correspondant à une quantité de rayonnement débité en une seconde.

Et 1000 R = 5 H ... 1 R = 0,005 H.

Chaque appareil a une constante K, mesurée par R, par exemple K = 109 R pour la petite capacité. Les mesures de l'intensité du rayonnement se font alors de la façon suivante:

Constante de l'ionomètre K = 109 R.

Temps de chute de l'électromètre de 60 à 10 degrés de l'échelle graduée t = 90".

$$\text{Intensité } i = \frac{K}{t} = \frac{109}{90} = 1{,}21 \text{ R par seconde.}$$

Solomon compare donc ses résultats avec l'ionisation produite par une quantité donnée de Radiumélément et arrive de cette façon à doser les rayons X.

Friedrich et Krònig ont proposé comme unité de mesure l'unité désignée par Kohlrausch et l'ont définie de la façon suivante : Lunité *e* est la quantité du rayonnement nécessaire pour transporter par ionisation une quantité d'électricité égale à une unité électrostatique dans un centimètre cube d'air. Et l'unité électrostique est la quantité électrique nécessaire pour charger la capacité de 1 cm à 300 volts.

## DEUXIEME PARTIE.

## APPLICATION DE L'IONOMETRIE A LA RADIOTHERAPIE PROFONDE

L'interprétation et l'application des mesures d'ionométrie à la pratique de la radiothérapie exigent la connaissance des lois de propagation et d'absorption des rayons Röntgen.

1. Loi du carré de la distance.

Tout le monde sait que l'intensité du rayonnement X varie en raison inverse du carré de la distance de son foyer. Quelques mesures pratiquées avec l'ionométrie de Solomon confirmeront ces données et prouveront l'exactitude de cette méthode.

Exemple:

Appareillage Commutateur Tournant Gaiffe.
Ampoule Coolidge Standard.
Etincelle équivalente 25 cm. Milliampères 2,5.

*Première expérience:*

Distance anticathode-chambre d'ionisation: 20 cm.
Temps de chute de l'électroscope de 60-10 de l'échelle graduée en prenant la moyenne de 3 mesures.

$$t = 52$$
$$56 = 54$$
$$54$$

Deuxième expérience :
Distance anticathode — chambre d'ionisation : 40 cm.

$$t = 214$$
$$216 = 216$$
$$217$$

Par conséquent l'intensité du rayonnement $i_1 = \frac{K}{t} = \frac{109}{54} =$ 2,0 R par seconde pour une distance focale de 20 centimètres.

$i_2 = \frac{109}{216} = 0{,}50$ R par seconde pour une distance focale de 40 centimètres.

| | Temps de chute | Intensité du rayonnement par seconde |
|---|---|---|
| Distance focale 20 cm | 54 | 2,0 R |
| Distance focale 40 cm | 216 | 0,50 R |

L'intensité du rayonnement a donc diminué d'après la loi du carré des distances de 25 %, en augmentant la distance de 20 à 40 centimètres.

II. Absorption des rayons X par la matière.

En traversant la matière les rayons X subissent une seconde diminution qui s'accroit vite avec le poids atomique du corps absorbant. Pour déterminer cette perte on peut mesurer l'intensité du rayonnement avant et après le passage par un corps absorbant comme un filtre d'aluminium et on peut se faire ainsi une idée de la diminution des rayons absorbés par le filtre et la valeur du coëfficient de transmission de ce dernier.

Nous avons déterminé à l'aide de l'ionomètre ce coëfficient de transmission pour une série de filtres employés en radiothérapie. Ce coëfficient est égal au rapport inverse des temps de chute de l'aiguille de l'électroscope observés avant et après le passage par un filtre:

Conditions d'expérience:

Appareillage Commutateur Tournant Gaiffe.

Ampoule Coolidge Standard.

Etincelle équivalente 25 cm correspondant à un rayonnement de 7-8 degrés Benoist.

Milliampères 2.5.

Distance foyer-chambre d'ionisation 23 cm.

| | Chute de l'électroscope | Intensité du rayonnement en R. | Pourcentage du rayonnement transmis | Coefficient de transmission du filtre |
|---|---|---|---|---|
| Sans filtre | 54" | 2 R | 100% | |
| 1 mm Al | 115" | 0,94 R | 47% | 0,47 |
| 5 mm Al | 340" | 0,32 R | 16% | 0,16 |
| 12 mm Al | 865" | 0,13 R | 6% | 0,06 |
| 5/10 mm Zn + 1 mm Al | 1010" | 0,11 R | 5% | 0,05 |
| 1 mm Zn + 1 mm Al | 1570" | 0,07 R | 3% | 0,03 |
| 1 mm Cu + 1 mm Al | 1590" | 0,06 R | 2,7% | 0,027 |

Ce coëfficient de transmission des filtres varie évidemment avec la pénétration des rayons employés. Les mêmes mesures faites avec un appareil de radiothérapie moderne et profonde nous ont donné de tout autres résultats.

Appareillage: Bobine Gaiffe III.

Tube: Furstenau Coolidge.

Etincelle équivalente 40 cm. Milliampères 2,5.

Distance foyer-chambre d'ionisation 23 cm.

| | Chute de l'électroscope | Pourcentage du rayonnement transmis | Coefficient de transmission du filtre |
|---|---|---|---|
| Sans filtre | 7" | 100% | |
| 1 mm Al | 9" | 77% | 0,77 |
| 5 mm Al | 17" | 41% | 0,41 |
| 12 mm Al | 29" | 24% | 0,24 |
| 5/10 mm Zn + 1 mm Al | 26" | 26% | 0,26 |
| 8/10 mm Zn + 1 mm Al | 30" | 23% | 0 23 |
| 1 mm Zn + 1 mm Al | 41" | 17% | 0,17 |
| 1 mm Cu + 1 mm Al | 43" | 16% | 0,16 |

Il était intéressant de comparer ces données avec les résultats que Belot avait trouvés à l'aide d'une autre méthode, la méthode

photométrique. Nous avons dessiné une courbe faite en analogie avec le tableau établi par Belot pour le calcul des doses des rayons X après filtration. Nous avons mis en abscisse l'épaisseur et en ordonné le pourcentage du rayonnement transmis par les différents filtres, et nous avons nommé A le faisceau du rayonnement fourni par un appareil marchant à une tension de 40 cm étincelle équivalente, B le faisceau du rayonnement fourni par un appareil

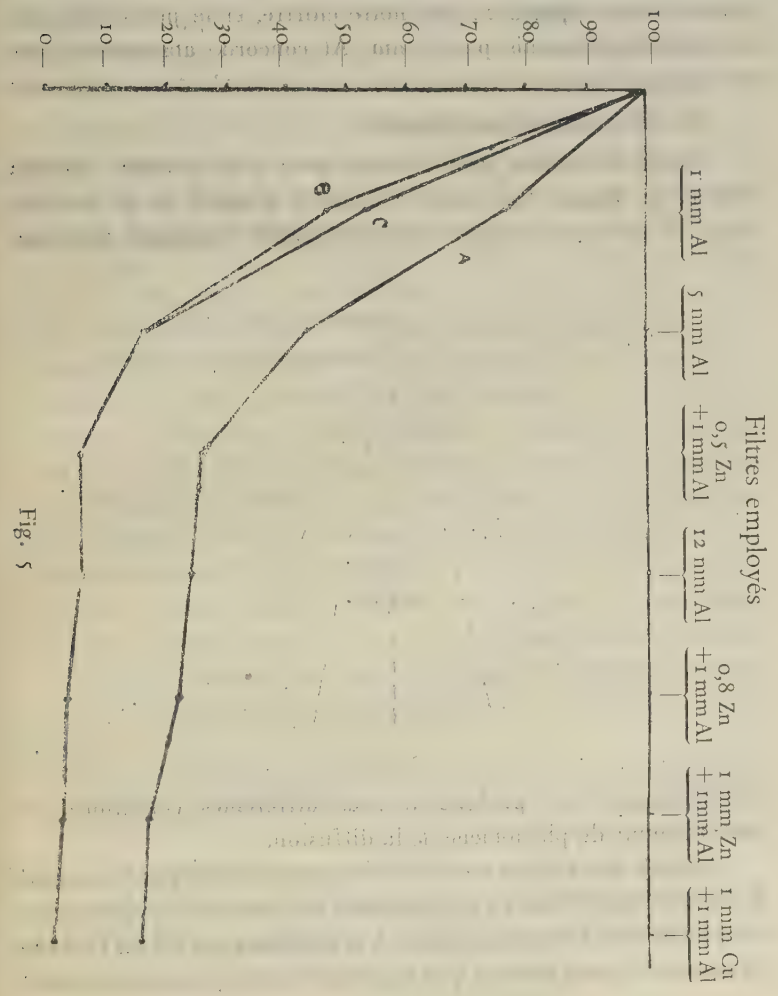



Fig. 5

marchant à 25 centimètres étincelle équivalente correspondant à un rayonnement de 7—8 degrés Benoist et C le faisceau établi par Belot pour un rayonnement de nouveau de 7-8 degrés Benoist. Le tableau de Belot ne comprend que les filtres d'aluminium d'épaisseur croissante.

Pour ces filtres, la courbe C de Belot et notre propre courbe B, représentant qualitativement le même rayonnement, sont presque identiques. La fraction du rayonnement transmis par 1 mm Al d'après Belot dépasse un peu notre chiffre, et le pourcentage du rayonnement transmis par 5 mm Al concorde absolument avec nos propres mesures obtenues par une méthode toute différente.

III. Rôle des rayons diffusés.

Après ces études préliminaires nous nous sommes occupés surtout du dosage des rayons X dans la pratique de la radiothérapie, et nous nous sommes efforcés d'établir l'intensité du rayon-

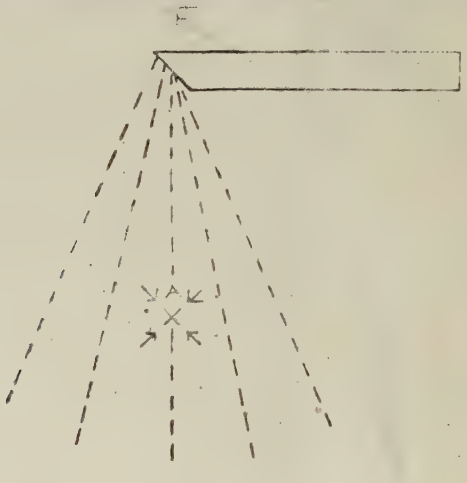


Fig. 6

nement absorbé en profondeur sous différentes conditions, en tenant compte du phénomène de la diffusion.

On sait que chaque particule du corps traversé par les rayons X émet une partie de ce rayonnement en forme de rayons secondaires diffusés. Prenons un point A et dirigeons sur lui un faisceau de rayons X, nous verrons que le point A recevra un rayonnement

provenant de l'anticathode de l'ampoule et en plus un rayonnement de rayons diffusés, émis par les particules de son entourage. L'effet des rayons secondaires a été étudié par Sagnac (1). mais des notions plus détaillées nous ont été communiquées par Barkla (2) et Sadler et Masham. (3).

Les rayons diffusés se produisent au contact de toute molécule frappée par les rayons primaires. Ils naissent dans le verre de l'ampoule, dans les couches d'air sousjacente à l'ampoule et dans le corps du sujet à irradier. Ils émettent à leur tour des rayons diffusés tertiaires, et tout ce rayonnement secondaire et tertiaire se propage dans tous les sens de l'espace. L'importance capitale de ce rayonnement diffusé en radiothérapie réside dans le fait, que dans le corps humain les rayons diffusés ne sont pas absorbés dès leur origine, mais se propagent en tous sens, renforçant ainsi l'action du rayonnement primaire. La diffusion pouvait être négligée autrefois, où on se servait de rayons beaucoup plus mous, émettant très peu de rayons diffusés. Aujourd'hui, où l'on se sert de rayons plus pénétrants, elle est de première importance, car les rayons diffusés s'ajoutent à la dose incidente augmentant la dose profonde en des proportions très grandes. Le rayonnement diffusé ne se distingue du rayonnement primaire que par sa direction et possède toutes les propriétés du rayonnement primaire.

Friedrich et Krönig ont démontré l'importance du rayonnement diffusé en 1915 (4) Ils ont reconnu que l'émission du rayonnement secondaire diffusé dépend:

1. Du caractère du rayonnement primaire; le rayonnement secondaire diffusé s'accroît avec la dureté des rayons primaires.

2. De la constitution physique du corps traversé. La diffusion se produit plus sensiblement dans les corps à poids atomique élevé.

3. De la grandeur du volume parcouru par les rayons X. Le rayonnement diffus est plus intense dans la profondeur du

(1) Annales de Chimie et de Physique 7 XXII page 493 1901.

(2) The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 7 page 543 et 812 1906.

(3) Phil. Mag. VI. 24, page 138 1912.

(4) Münchener med. Wochenschrift 1915 Nr. 49.

corps à irradier qu'à la surface, et il est plus grand au milieu d'un cône d'émission qu'à son bord. Le maximum de rayonnement secondaire sera donc atteint pour un point situé au centre d'une pyramide aussi grande que possible.

Les mêmes auteurs ont démontré d'une façon très évidente l'influence du rayonnement diffusé pour la dose profonde. Ils ont calculé la valeur de la dose profonde pour un rayonnement filtré à travers 10 mm d'aluminium émis par un tube Coolidge, au moyen du coëfficient pur d'absorption (1) et de la loi du carré de la distance. Ensuite ils ont mesuré à l'aide de l'ionomètre la dose profonde, en plongeant la chambre d'ionisation dans une cuve à eau, se rapprochant de cette façon de la diffusion produite dans le tissu organique (2).

Les résultats obtenus par le calcul de la dose profonde et les résultats obtenus expérimentalement à l'aide de l'ionomètre présentaient des divergences considérables. Les valeurs de la dose profonde mesurées ionométriquement dépassaient de beaucoup les résultats obtenus par calcul, et ce désaccord ne pouvait être expliqué autrement que par le fait que le calcul de la dose profonde ne comprenait pes les rayons secondaires.

Ils en conclurent que la valeur de la dose profonde ne peut pas être déterminée par calcul, mais doit être mesurée ionométriquement en plaçant la chambre d'ionisation sur la région à irradier ou en déterminant la dose profonde à l'aide d'un « fantôme d'eau » (3).

(1) Ou plutôt de la « Halbwertschicht » de Christen, méthode qui détermine le degré de pénétration d'un rayonnement par l'épaisseur d'eau qui réduit de moitié l'intensité du rayonnement incident.

(2) Des mesures très exactes avaient prouvé auparavant que le coefficient d'absorption des rayons Röntgen dans le tissu humain est sensiblement le même que dans un même volume donné d'eau.

(3) Le fantôme d'eau est un récipient qui permet de placer par un dispositif spécial une chambre d'ionisation à différents niveaux, facilitant ainsi les mesures en des profondeurs différentes.

IV. Manière de procéder pour déterminer la dose profonde.

Toutes les mesures en profondeur que l'on fait nous donnent donc un chiffre qui n'est pas dû à l'absorption seule, mais à l'absorption additionnée du rayonnement secondaire. Nous avons fait une grande série de mesures de la dose profonde.

Ces expériences ont eu entre autres le but pratique de nous permettre de nous rendre compte d'une façon aussi précise que possible du rendement de l'appareil de radiothérapie fourni par la maison Gaiffe. Ces résultats ne concordent pas tout-à-fait avec les résultats publiés par Solomon (1). Comme cette différence pourrait être due à des conditions spéciales dans lesquelles se trouvait l'auteur, nous allons décrire en détail la manière dont nous avons procédé nous-mêmes.

La source radiogène et l'appareil de mesure étaient les mêmes que ceux employés par l'auteur, c'est-à-dire:

Bobine Gaiffe No 111.
Ampoule Coolidge baignant dans la cuve à huile.
Appareil de mesure: Ionomètre de Solomon.

Pour l'évaluation de la dose profonde et du rapport entre la dose profonde et la dose incidente, nous nous sommes servis de deux cuves à eau. une de 5 centimètres de profondeur servant comme corps de diffusion et placée directement sous la chambre d'ionisation, une autre de 10 centimètres de profondeur, ayant pour le reste les mêmes dimensions de 20 sur 20 cm. Nous avons commencé par déterminer la dose profonde par rapport à la dose de surface pour une distance foyer-chambre d'ionisation de 23 cm et un champ de 6 sur 8 cm. (2).

Nous avons mesuré la dose incidente à une distance focale de 23 cm. nous avons éloigné ensuite la chambre d'ionisation de 10 cm et nous avons interposé la cuve à eau de 10 cm de profondeur, le deuxième récipient de 5 cm de profondeur restant tou-

(1) Bulletins et mémoires de la Société de Radiologie Médicale de France, janvier 1922, page 30.

(2) C'est ce que Seitz et Wintz appellent la « prozentuale Tiefendosis ».

jours sous la chambre d'ionisation, et nous avons déterminé la dose profonde.

Exemple:

Etincelle équivalente 40 cm.

Millampères 2,5. Filtres 5/10 Zn plus 1 mm. Al.

Temps de chute de l'électroscope:

| Surface | en 10 cm de profondeur |
|---|---|
| 70 | 350 |
| 75 = 74 | 360 = 367 |
| 78 | 390 |

Or, l'intensité du rayonnement est en rapport inverse avec les temps de chute de l'électroscope. Si nous admettons la dose incidente à 100, et si nous nommons la dose profonde x, nous aurons la proportion suivante:

$$\frac{x}{100} = \frac{74}{367}, \quad x = \frac{7400}{367} = 20,\ 2\%.$$

La dose absorbée en 10 cm de profondeur est donc de 20,2 % de la dose absorbée en surface pour une distance focale de 23 cm un champ d'irradiation de $6 \times 8$ cm, filtration à travers 5/10 de Zn + 1 mm Al et les conditions électriques ci-dessus.

Pour une distance focale de 30 cm, un champ d'irradiation de $20 \times 20$ cm, filtration à travers 5 millimètres d'aluminium, Solomon a obtenu à 10 cm de profondeur une dose profonde de 40 %. Nous avons pratiqué les mêmes mesures avec le même appareillage et voici nos résultats:

Etincelle équivalente 40 cm.

Milliampères 2,5.

Distance focale 30 cm. Champ d'irradiation $20 \times 20$.

Filtration à travers 5 mm. d'Al.

| Temps de chute de l'électroscope. Surface | en 10 cm de profondeur | Dose profonde |
|---|---|---|
| 40 | 150 | |
| = 41 | = 152 | 26,9 % |
| 42 | 154 | |

Ces mesures ont été répétées à différentes reprises et à différents jours pour exclure aussi des irrégularités pouvant provenir d'instabilité du courant primaire, nos résultats étaient les mêmes et n'ont jamais dépassé 26,9 %. Solomon, qui a obtenu 40 %, cite un article de Friedrich et Körner (1) et le relevé des mesures faites par ces auteurs avec trois différents appareillages de radiothérapie nous donne les résultats suivants que nous avons mis en comparaison avec nos expériences et qui touchent de très près nos propres mesures:

Appareillage

| | Rotax | Veifa | Symetrie | Gaiffe Bobine |
|---|---|---|---|---|
| Dose profonde à 10 cm | 26,1 % | 26,2 % | 26,3 % | 26 9 % |

L'intensité du rayonnement obtenu à 10 cm de profondeur avec l'appareil Gaiffe dépasse légèrement le rayonnement fourni par les installations allemandes.

Nous avons continué nos recherches en contrôlant les mesures de Friedrich et Körner effectuées cette fois-ci avec des rayons mieux filtrés, et nous avons de nouveau obtenu des résultats sensiblement analogues, ne dépassant que légèrement les chiffres des auteurs allemands.

Appareillage

| | Rotax | Veifa | Symetrie | Gaiffe Bobine |
|---|---|---|---|---|
| Filtres | 1 mm Cu | 1 mm Cu | 1 mm Cu | 1 mm Zn + 1 mm Al (2) |
| Dose profonde à 10 cm | 33,6 % | 34,9 % | 34 % | 35 % |

V. Augmentation de la dose profonde par un filtrage de plus en plus conséquent.

La question du quotient de dose profonde — dose superficielle est une des plus importantes en radiothérapie et les plus grands

(1) Strahlentherapie Band XI, Heft 3, 1920.

(2) Nedisposant pas d'un filtre en cuivre, nous avons employé un filtre de zinc qui a, comme nous l'avons vu, presque le même coefficient de transmission de sorte que les mesures sont bien comparables.

efforts ont été faits de tout temps pour réduire la différence entre la dose de surface et la dose profonde.

Perthes eut l'idée de faire traverser le faisceau de rayons X une substance qui devait retenir les rayons les plus mous, nocifs pour la peau et introduisit les filtres en feuilles d'aluminium. Le but du filtre était de réduire l'écart entre la quantité des rayons qui frappe la peau et la quantité qui est transmise à la profondeur. Belot et Guilleminot ont étudié les modifications subies par le rayonnement en traversant le filtre, et ils ont trouvé que, tandis que sans filtre 5 % du rayonnement incident était transmis à 8 cm de profondeur, avec un filtre de 5 mm Al, 20% du rayonnement était transmis à la même profondeur.

Aujourd'hui l'on sait que le filtrage fait une répartition plus uniforme des doses dans les différentes couches superposées, et a à la suite une augmentation relative de la dose profonde. Les expériences suivantes faites à l'aide de l'ionomètre démontreront l'amélioration de la dose profonde par l'emploi de filtres plus absorbants.

| Appareillage: Commutateur | Appareillage Bobine. |
|---|---|
| Tournaut Gaiffe; | Gaiffe N° 111. |
| Tube Coolidge Standard; | Tube Furstenau Coolidge. |
| Milliampères 2,5; | Milliampères 2,5. |
| Distance focale 23 cm; | Distance focale 23 cm. |
| Champ 6 sur 8; | Champ 6 sur 8. |
| *Etincelle équivalente* 25 cm; | *Etincelle équivalente* 40 cm. |

| | Dose profonde à 10 cm | Dose profonde à 10 cm |
|---|---|---|
| Sans filtre | 2,8% | 10% |
| 1 mm Al | 4,7% | 12% |
| 5 mm Al | 9,6% | 18% |
| 12 mm Al | 15% | 20,4% |
| 0,5 Zn + 1 mm Al | 19,1% | 20,6% |
| 1 mm Zn + 1 mm Al | 20,1% | 26% |
| 1 mm Cu + 1 mm Al | 22,5% | 26,3% |

VI. Amélioration de la dose profonde par l'augmentation du champ d'irradiation.

En employant des champs de grandeurs différentes nous avons étudié l'influence de la grandeur du champ d'irradiation sur la dose profonde, et nous avons effectué des mesures toujours à la même distance focale de 23 cm. Nous avons opposé les résultats des chutes de l'électroscope obtenus avec le même appareil travaillant une fois à 25 cm, ce qui correspond à un rayonnement de 7-8 degrés Benoist, et une autre fois à 15 cm étincelle équivalente, correspondant à un rayonnement de 4-5 degrés Benoist.

*Résultats:*

Appareillage: Commutateur Tournant de la maison Gaiffe. Tube Coolidge Standard.

Distance focale 23 cm.

Temps de chute de l'électroscope:

| | Etincelle équivalente 25 cm | Etincelle equivalente 15 cm |
|---|---|---|
| Champ 6 × 8 cm | $\frac{335}{335} = 335$ | $\frac{2100}{2025} = 2062$ |
| Champ 9 × 12 cm | $\frac{315}{315} = 315$ | $\frac{1825}{1800} = 18'2$ |
| Champ 10 × 15 cm | $\frac{180}{180} = 180$ | $\frac{1775}{1775} = 1775$ |
| Champ 20 × 20 cm | $\frac{142}{149} = 145$ | $\frac{1700}{1675} = 1687$ |

L'intensité du rayonnement augmente avec la grandeur du champ d'irradiation, et cette augmentation est plus sensible avec des rayons durs qu'avec des rayons mous. Nous voyons qu'à 25 cm étincelle équivalente la chute de l'électroscope pour un champ de 20 sur 20 cm a été obtenu en plus de la moitié du temps en

comparaison avec un champ de 6 sur 8 cm, tandis qu'avec une tension de 15 cm la chute de l'électroscope pour le même champ 20 sur 20 n'a été que de 1/4 plus vite que pour le champ 6 sur 8.

VII. Amélioration de la dose profonde par l'augmentation de la distance focale.

Indépendamment de la qualité des rayons émis par l'empoule et des filtres employés, l'intensité du rayonnement reçue en profondeur dépend également de la distance du foyer à la surface et à la profondeur.

Négligeons le facteur d'absorption et admettons une surface cutanée située à 10 cm de l'anticathode exposée aux rayons. A 10 cm de profondeur sous la peau le rayonnement incident sera réduit à 1/4 de sa valeur. Si au contraire la peau est à 50 cm du focus, c'est à 50 cm seulement sous la peau que le rayonnement sera réduit à 25% de sa valeur. La différence entre la qualité reçue par les téguments et les plans profonds diminue avec la grandeur de la distance de l'ampoule, et la dose effectivement reçue en profondeur par rapport à la dose incidente augmente en éloignant la source radiogène.

Les expériences suivantes s'occupent de cette influence de la distance focale sur la dose profonde. Nous avons mesuré la dose absorbée en 10 cm de profondeur pour les distances croissantes de 23 cm, 30 cm, 40 cm et 50 cm.

La question de la distance focale étant en radiothérapie intimement liée à la grandeur du champ à irradier, nous avons déterminé en même temps à l'aide de l'ionomètre les doses profondes pour les champs de 6 sur 8, 10 sur 15 et 20 sur 20 cm.

Appareillage: Bobine Gaiffe No III.

Ampoule Coolidge baignant dans la cuve à huile.

Étincelle équivalente 40 cm entre pointes.

Milliampères 2.5.

Filtration à travers 1 mm de Zn + 2 mm Al.

*I. Distance anticathode-chambre d'ionisation 23 cm.*

Temps de chute

| | Surface | Sous 10 cm d'eau | Dose profonde |
|---|---|---|---|
| Champ 6 × 8 | 52 / 59 = 55″ | 242 / 245 = 243″ | 23% |
| Champ 10 × 15 | 52 / 50 = 51″ | 190 / 179 = 185″ | 27% |
| Champ 20 × 20 | 45 / 45 = 45″ | 157 / 153 = 155″ | 29% |

*II. Distance anticathode-chambre d'ionisation 30 cm.*

Temps de chute

| | Surface | Sous 10 cm d'eau | Dose profonde |
|---|---|---|---|
| Champ 6 × 8 | 95 / 100 = 98″ | 390 / 400 = 395″ | 25% |
| Champ 10 × 15 | 85 / 90 = 88″ | 260 / 268 = 264″ | 33,3% |
| Champ 20 × 20 | 82 / 85 = 83″ | 240 / 238 = 239″ | 35% |

*III. Distance anticathode-chambre d'ionisation 40 cm*

Temps de chute

| | Surface | Sous 10 cm d'eau | Dose profonde |
|---|---|---|---|
| Champ 6 × 8 | 181 / 171 = 179″ | 584 / 576 = 580″ | 30% |
| Champ 10 × 15 | 173 / 167 = 170″ | 480 / 476 = 478″ | 36% |
| Champ 20 × 20 | 150 / 150 = 150″ | 382 / 387 = 385″ | 39% |

*IV. Distance anticathode-chambre dionisation 50 cm*

Temps de chute

| | Surface | Sous 10 cm d'eau | Dose profonde |
|---|---|---|---|
| Champ 6 × 8 | 235 / 225 = 230" | 685 / 700 = 692" | 33% |
| Champ 10 × 15 | 220 / 210 = 215" | 480 / 488 = 484" | 44,4% |
| Champ 20 × 20 cm | 190 / 198 = 194" | 397 / 404 = 404" | 49% |

Nous voyons que la dose profonde augmente avec la distance de l'anticathode à la peau et la grandeur du champ d'irradiation en des proportions bien établies, que nous retrouverons dans les conclusions de ce travail. Et non seulement le temps nécessaire pour appliquer une dose en profondeur est raccourci par l'augmentation du champ d'irradiation, mais aussi le temps nécessaire pour appliquer une dose en surface, pas dans les mêmes proportions il est vrai. Nous avons trouvé que:

a) La diminution de temps pour appliquer une dose en *profondeur* en augmentant le champ de 6 × 8 à 20 × 20 est de 34—42 %.

b) La diminution de temps pour appliquer une dose en *surface* en augmentant le champ de 6 × 8 à 20 × 20 n'est que de 16—20 %.

Ce gain de temps par l'augmentation du champ d'irradiation doit être attribué au rayonnement secondaire.

VIII. Autres application pratiques de l'ionométrie.

Un cas de brûlures très étendues du dos, des fesses et des cuisses qui s'était produit chez une malade en traitement pour une adénopathie cervicale tuberculeuse dans un service de radiothérapie, nous a rendu prudent vis-à-vis d'un rayonnement pouvant provenir du col de l'ampoule Coolidge qui se trouve en dehors de la cupule protectrice du porte-ampoule. Cet accident était d'autant plus curieux et incompréhensible au premier abord que la région d'irradiation même ne présentait pas la moindre radiodermite.

Nous avons alors placé la chambre d'ionisation sous le col du tube Coolidge en des endroits différents que nous avons nommé A, B, C, D.

A se trouvait sur la ligne tangente à la capule à une hauteur de 15 cm.

B se trouvait 7,5 cm derrière A à la même hauteur.

C setrouvait 15 cm derrière A à la même hauteur.

D se trouvait 25 cm derrière A à la même hauteur.

Et voici les résultats que nous avons obtenus.

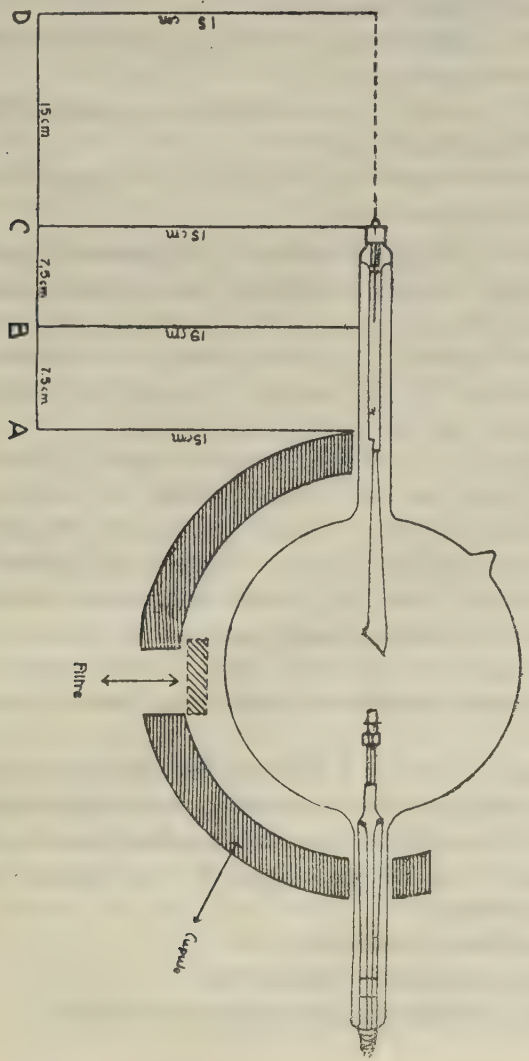



Fig. 7.

Conditions:

Appareillage Commutateur Tournant Gaiffe.

Etincelle équivalente 17 cm.

Milliampères 1,5.

Filtration à travers 4 mm d'Al.

I. A = 1150". $i_A$ = 0,095 R par seconde = 342 R par heure = 1,7 H par heure.

II. B = 250". $i_B$ = 0,44 R par seconde = 1584 R par heure = 8 H par heure.

III. C = 375". $i_C$ = 0,29 R par seconde = 1044 R par heure = 5,2 H par heure.

IV. D = 900". $i_D$ = 0,12 R par seconde = 432 R par heure = 2,1 H par heure.

Nous voyons que l'intensité du rayonnement partant du col de l'ampoule est assez considérable pour pouvoir dépasser à une distance de 15 cm la dose de 5 H en une heure, et il est certain que les brûlures arrivées à la pauvre malade en des régions en dehors de la direction du rayon normal ne peuvent être attribuées qu'au rayonnement émis par le col du tube Coolidge.

Le nouveau dispositif de la maison Gaiffe qui place l'ampoule Coolidge dans une cuve remplie d'huile, et recouverte par du plomb nous met à l'abri de pareils accidents et offre une protection pratiquement suffisante contre le rayonnement primaire émis par le tube. Malgré toutes ces garanties les personnes séjournant dans la salle de radiothérapie restent exposées aux dangers du rayonnement secondaire et pour nous rendre compte jusqu'où pouvaient agir les rayons secondaires, nous avons réalisé l'expérience suivante:

Nous avons placé la chambre d'ionisation à 50 cm latéralement du malade tout à fait en dehors de la direction du faisceau primaire; la chambre se trouvait à la même hauteur que la région du malade à irradier, qui se trouvait à une distance anticathode-peau de 40 cm.

Conditions d'expérience:

Appareillage Gaiffe Bobine III.

Tube Coolidge baignant dans la cuve à huile.

Etincelle équivalente 40 cm Milliampères 2,5.

Filtration à travers 1 mm de Zn + 2 mm d'Al.

Temps de chute de l'électroscope de 60-50 degrés de l'ionomètre t = 2820.

$$i = \frac{K}{t} = \frac{109}{2820} = 0{,}038 \text{ R par seconde} = 2/3 \text{ H par heure.}$$

En d'autres mots: à 50 centimètres du malade avec les conditions électriques décrites ci-dessus la dose de 5 H ou la dose érythème due exclusivement au rayonnement secondaire serait reçue en 7 heures ½.

Nous avions décrit dans la première partie de ce travail un ionomètre allemand, qui avait été mis tout d'abord à notre disposition. Nous avons pratiqué des mesures avec les deux appareils, et nous avons obtenu des résultats sensiblement analogues. Cependant l'apparil de mesure de Solomon nous a paru d'un maniement plus facile; la fuite spontanée de cet appareil était inférieure à celle de l'appareil fourni par la maison allemande. Le long conducteur flexible permet d'un côté de pratiquer les mesures sur place, sur le champ d'irradiation même, d'un autre côté il permet de placer l'électroscope derrière une paroi plombifère, assurant ainsi une protection de l'appareil et du personnel contre les rayons Röntgen incidents. Nous avons donc trouvé tout avantage de nous servir exclusivement de l'appareil de Solomon et nous n'avons cité dans ce travail que les expériences faites avec ce dernier modèle.

## CONCLUSIONS

La condition première de tout succès en radiothérapie comme en thérapeutique générale consiste en un dosage aussi sûr et aussi exact que possible. Seul un dosage établi sur des bases physiques sérieuses et solides nous donnera la clef d'une thérapeutique utile. Nous croyons avoir prouvé que la méthode ionométrique répond à ses besoins.

Cette méthode nous a permis d'établir le coëfficient de transmission pour les filtres d'aluminium, de zinc et de cuivre, employés en radiothérapie. Cette méthode ionométrique nous a permis d'étudier l'influence du rayonnement secondaire qui est d'un intérêt

capital en radiothérapie profonde. Nous avons pu évaluer d'une façon très précise l'effet de la distance anticathode-peau et l'effet de la grandeur du champ d'irradiation sur la dose profonde. Nous basant sur les résultats de nos mesures nous avons pu prouver que la dose profonde augmente avec la distance de l'anticathode à la peau et la grandeur du champ d'irradiation.

1. La dose profonde augmente pour un champ d'irradiation de 6 × 8 cm en augmentant la distance focale de 23 à 50 cm d'environ 45 %.

2. La dose profonde augmente pour un champ d'irradiation de 10 × 15 cm en augmentant la distance focale de 23 à 50 cm de 60 à 65 %.

3. La dose profonde augmente pour un champ d'irradiation de 20 × 20 cm en augmentant la distance focale de 23 à 50 cm d'environ 70 %.

Nous voyons l'intérêt qu'il y a en radiothérapie pour obtenir un bon rendement en profondeur, d'employer des champs de grandeur considérable comme les champs de 20 × 20 cm.

L'augmentation du champ d'irradiation améliore la dose profonde et diminue en même temps le temps nécessaire pour appliquer une dose en surface et en profondeur.

Cette diminution de temps est plus appréciable pour l'application d'une dose en profondeur que pour l'application d'une dose en surface, grâce à l'émission du rayonnement secondaire diffusé qui est plus efficace en profondeur. Nous avons vu que :

1. L'augmentation du champ d'irradiation de 6 × 8 à 20 × 20 cm ne diminue le temps pour appliquer une dose en *profondeur* de 34—42 %.

2. La même augmentation du champ d'irradiation de 6 × 8 à 20 × 20 cm ne diminue le temps pour appliquer une dose en *surface* que de 16—20 %.

En outre nous avons pu montrer que l'intensité du rayonnement provenant du col de l'ampoule Coolidge est assez important pour pouvoir occasionner des brûlures, si le temps d'irradiation est prolongé suffisamment.

La nouvelle installation de la maison Gaiffe met l'ampoule Coolidge dans un bain d'huile et retient les rayons primaires aber-

..ats par une épaisse lame de plomb. Ce dispositif ne nous garantit pas contre le rayonnement secondaire qui ne peut pas être négligé, la dose érythème due exclusivement au rayonnement secondaire pouvant être reçue à une distance de 50 cm du malade en 7 heures 1/2 avec un tube marchant à une tension de 40 cm étincelle équivalente et une intensité de 2,5 Milliampères.

Toutes ces mesures ont pu être effectuées ionométriquement, et il est certain que la méthode ionométrique réalise un grand progrès permettant ainsi à la radiothérapie d'étendre son champ d'action.

Certaines difficultés comme l'isolation pas tout à fait complète de l'appareil, la décharge spontanée par l'ionisation de l'air contenu dans la salle de radiothérapie et par le rayonnement secondaire rendent cette méthode délicate et exigent une grande minutie, mais il est évident que cette méthode est destinée à nous rendre de grands services et à nous donner des connaisssances très précieuses sur la répartition de l'énergie roentgenienne.

Vu: *Le Doyen,*
Signé: *WEISS.*

Vu: *Le Président,*
signé: *Dr L. BLUM.*

## BIBLIOGRAPHIE.

BARKLA. — The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 21 (1911). Phil. Mag. 7 (1906).

BENOIST et HURMUZESCU. — Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences de Paris. Tome 122 (1896).

BRAGG. — Phil. Mag. 20 (1910).

Proceedings of the Royal Society of London A 85 (1911).

Mc. CCLELLAND. Phil. Mag. 46 (1898).

Mme CURIE. — Traité de radioactivité.

DESSAUER. — Grundlagen und Messmethoden der Tiefentherapie mit Röntgenstrahlen. Archiv für Gynäkologie. Bd. III, Heft 2.

FRIEDRICH und KÖRNER. — Experimentelle Untersuchungen über den Einfluss des Röhrenabstandes und der Feldgrösse auf den Dosenquotienten. Strahlentherapie, Bd. XI, Heft 3.

FRIEDRICH und KRÖNIG. — Einfluss der Streustrahlung auf die Dosis den Dosenquotienten. Münchener medizinische Wochenschrift 1915 No. 49.

GIESE. — Wiedemanns Annalen (1882).

KRÖNIG und FRIEDRICH. — Physikalische und biologische Grundlagen der Strahlentherapie, 1918.

LEDOUX-LEBARD et DAUVILLIER. — La physique des rayons X (1921).

OUDIN et ZIMMERN. — Radiothérapie (1913).

PERRIN. — Comptes Rendus tome 123 (1896).

RIGHI. Comptes Rendus tome 122 (1896).

RUTHERFORD. — Phil. Mag. 42.
Phil. Mag. 44.
Phil. Mag. 47.
Proceedings of the Cambridge Physical Society 9 (1896).

SADLER et MASHAM. — Phil. Mag. VI 24 (1912).

SAGNAC. — Annales de Chimie et de Physique 7 XXII (1901).

LEITZ und WINTZ. — Unsere Methode der Röntgen-Tiefentherapie und ihre Erfolge (1920).

SOLOMON. — L'ionométrie radiologique. Journal de Radiologie et d'Electrologie, tome V, N° 5).

Dosage des rayons de Röntgen par la méthode ionométrique. (Journ. de Rad. et d'Electr., tome V, No. 17).

Ionomètre radiologique. ((Journ. de Rad. et d'Electr. tome V, N° 11).

Sur la mesure de la dose profonde en radiothérapie très pénétrante. (Bulletins et Mémoires de la Société de Radiologie Médicale de France, janvier 1922).

SWYNGEDAUW. — Comptes Rendus, tome 122. (1896).

SZILLARD. — Uber die absolute Messung der Röntgen- und x-Strahlen in der Biologie. Strahlentherapie Band 5 (1914).

Archives d'Electricité Médicale II (1914).

THOMSON. — Proceedings of the Royal Society of Londen 59 (1896).

TOWNSEND. — Die Jonisation der Gase. Handbuch der Radiologie Band I. (1920).

VILLARD. — Instruments de mesure à lecture directe par les rayons X. Archives d'Electricité Médicale 1908.

VOLTZ. — Die physikalischen und technischen Grundlagen der Messung und Dosierung der Röntgenstrahlen (1921).

Dosierungstafeln für die Röntgentherapie (1921).

WERY. — Les rayons secondaires. Journal de Radiologie de la Société belge de Radiologie. Volume XI, fascicule I (1922).

IMPRIMERIE CENTRALE CH. HILLER, STRASBOURG